

11. 地上型レーザースキャナの器械点設置位置検討のための 3次元モデルを用いたシミュレータの開発

国土技術政策総合研究所 ○早川 直樹
国土技術政策総合研究所 池田 誠
国土技術政策総合研究所 杉谷 康弘

1. 背景と目的

近年、「3次元計測技術を用いた出来形管理要領(案)¹⁾」により、水系、巻尺、レベル等の従来の計測技術に代わり、3次元座標値を取得可能な計測技術の出来形管理への活用が進んでいる。また、令和5年度から国土交通省直轄工事において BIM/CIM が原則適用となり、工事現場の3次元モデルの活用が進むと考えられる。

ところで、出来形管理に適用可能な3次元計測技術の一種である地上型レーザースキャナ(TLS)は、器械点からの距離や地形の凹凸形状により、計測可能な範囲が限定される。よって地上型レーザースキャナで計測した点群を出来形管理に活用する場合、一般的に複数の器械点から計測を行い、後処理で計測した点群データの位置合わせや合成を行う必要がある。しかしながら、器械点の配置が不適切だと、欠測箇所が生じ現場での追加計測や合成処理等の手戻りが発生する。このように、TLSを用いて出来形計測を実施する場合、事前に器械点の設置位置を検討することは、施工効率を向上させる上で非常に重要である。

そこで本研究では、3次元モデルを用いた TLS のシミュレータを開発し、シミュレータを用いて出来形計測を想定した TLS の器械点設置位置の検討が行えることを確認することとした。

2. TLS のシミュレータの概要

近年、ロボットの研究・開発においては、LiDAR センサが一般的に使用されており、LiDAR センサをシミュレーションするツールが提供されている²⁾。一方で、既存のツールはロボットの動作をリアルタイムにシミュレーションすることに主眼を置いており、出来形計測を想定した TLS のシミュレーションには適していない。具体的には、環境構築が困難であり、また TLS を再現する上で必要なパラメータ(例えば TLS の器械点設置位置の計測誤差など)や処理の追加をする必要がある。

そこで本研究では、TLS による出来形計測を想定した、環境構築が容易なシミュレータを開発することとした。具体的には、現場における TLS の器械点設置位置を検討するため、現場の3次元モデルに仮想的な TLS を配置し、TLS により得られる点群を計算・出力するシミュレータを開発した。

2.1 シミュレータの動作環境

開発したシミュレータは、以下の要件を満たすオープンソースの統合型3次元CG製作ソフトウェア「Blender」を用いて実装することとした。

- ・ Windows ・ MacOS ・ Linux などの OS のコンピュータで利用できること
- ・ 標準機能およびアドオン機能により、様々な形式の3次元モデルの入出力ができること
- ・ 3次元モデルの表示や編集ができること
- ・ Python 等で記述した自作のスクリプトから、3次元モデルに関する関数が容易に扱えること

2.2 シミュレータの使用手順

開発したシミュレータを使用する手順は以下の通りである。なお、以下に示す①～③の手順はいずれも Blender の標準的な機能を用いて実施する。

- ① Blender に計測対象となる地面・構造物等の3次元モデル(BIM/CIM データや設計データ、起工測量データ等を用いて作成)を読み込む
- ② TLS の設置検討位置に Blender のカメラオブジェクトを作成する
- ③ 3次元モデルのマテリアルや光源など、見た目に関する設定を行う
- ④ シミュレータのスクリプトを実行する

開発したシミュレータを使用する際の画面の例を図-1に示す。図-1の例では、国土技術政策総合研究所の建設 DX 実験フィールドの3次元モデル(UAV 写真測量により得られた地形と、Blender 上でモデリングした構造物・ターゲットスフィアを含む)を読み込み、仮想的な TLS として Blender のカメラオブジェクトを3個配置している。



図- 1 : シミュレータの画面の例

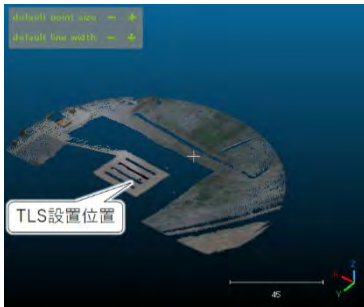


図- 2 : 出力された点群データの例(1 器械点分)

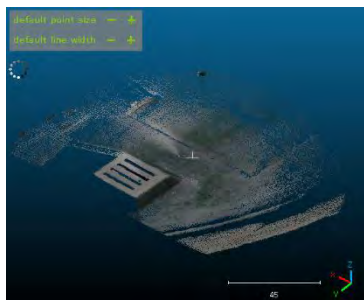


図- 3 : 出力された点群データの例(複数 TLS)

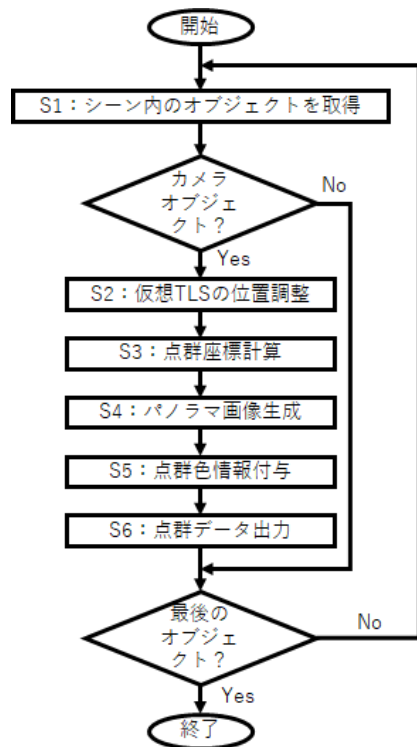


図- 4 : シミュレータのフローチャート

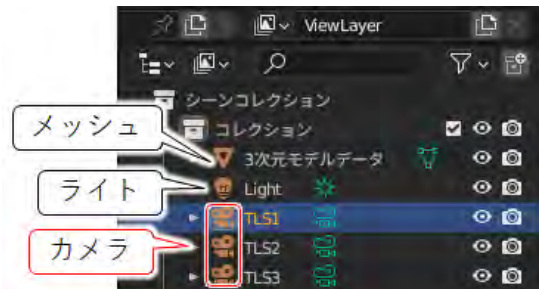


図- 5 : Blender シーン内のオブジェクトの例

シミュレータのスクリプトを実行すると、仮想的な TLS の位置から 3 次元モデル(図- 1 の例では建設 DX 実験フィールド)を計測した際の 3 次元座標値を計算し、3 次元点群データが出力される。

シミュレータから出力された 3 次元点群データを表示した例を図-2, 図-3 に示す。なお図-2 はある 1 か所に設置された TLS の点群データを表示したものであり、図- 3 は現場内に配置した 3 つの TLS の点群データを並べて表示したものである。図-2 の点群データは、地形形状や構造物などによりレーザーが遮蔽され、一部の領域の点群が取得できないことがわかる。一方、図-3 を見ると、TLS 周辺の点群が概ね取得できることがわかる。

なお 3 次元点群データは、以下の要件を満たすことから PCD 形式で出力することとした。

- 座標(XYZ)および色情報(RGB)を持つこと
- TLS の器械点位置や姿勢の情報を持つこと
- 実装が容易であること
- 点群処理ソフト「Cloud Compare」で表示・編集ができること

3. TLS のシミュレータの詳細な処理内容

シミュレータのスクリプトは、図-4 に示すフローチャートに従って動作する。

シミュレータのスクリプトはまず、Blender シーン内に存在する複数のオブジェクト(図- 5)のいずれかを取得する(S1)。そのオブジェクトがカメラオブジェクトの場合、次の処理(S2)に進み、カメラオブジェクト以外の場合、選択したオブジェクトがシーン内の最後のオブジェクトなら処理を終了し、シーン内に未取得のオブジェクトがある場合は再度 S1 において未取得のオブジェクトを取得し同様の処理を実行する。

開発したシミュレータでは、カメラオブジェクトを仮想的な TLS として扱う。S2 では、TLS が地面から一定の高さ(地上設置高さ)となるよう、カメラオブジェクトの位置を調整する。

次に S3 において、点群の座標を計算する。点群の座標計算の処理は以下の①～⑤の通りである。なお、①～⑤で求めるものの定義や関係性を図- 6 および図-7 に示す。図-6 中の x,y,z 軸は Blender の

カメラオブジェクトのローカル座標系における軸を表しており、z軸のマイナス方向がカメラの視線ベクトルである。

①計測する方向(計測方向ベクトル)を決定する。計測方向ベクトル $M(\theta, \varphi)$ は図-6に示す方向角 θ および仰角 φ により式(1)のように定義される。

$$M(\theta, \varphi) = \begin{pmatrix} \sin\theta \cdot \cos\varphi \\ \sin\varphi \\ -\cos\theta \cdot \cos\varphi \end{pmatrix} \quad (1)$$

②TLSの器械点座標(カメラオブジェクトの座標) P から計測方向ベクトルに射出したレイ(光線)と、3次元モデルとの交点座標 T をレイキャスト法により求める(Blenderのray_cast関数を使用)。ここで、計測角度の誤差を模擬する場合、実際のレイの射出方向(ray_cast関数に入力する計測方向ベクトル)は、計測方向ベクトル M に計測角度の誤差を入力値とする回転行列 $R(E_\theta, E_\varphi)$ を用いて、式(2)のように表せる。

$$\text{レイの射出方向} : R(E_\theta, E_\varphi) \cdot M(\theta, \varphi) \quad (2)$$

③式(3)により、交点座標 T とTLSの器械点座標 P から距離 D を求める。ここで、距離 D がTLSの計測範囲(距離)の最大/最小値の範囲内であれば④の処理に進み、範囲外であれば⑤へ進む。

$$D = |T - P| \quad (3)$$

④式(4)により、出力する点の座標 T' を求める。

$$T' = (D + E_D) \cdot M(\theta, \varphi) + P \quad (4)$$

なお、 E_D はTLSの計測距離の誤差である。

⑤①~④の手順を、TLSの計測範囲に存在しうるすべての方向角 θ および仰角 φ について繰り返し実行する。

S4およびS5では、S3で計算した点群に色情報を付与するための処理を行う。

まずS4では、TLSの位置から、計測対象である3次元モデルを見た時の画像を、パノラマ画像として生成する。これはBlenderの標準機能を用いて、正距円筒図のパノラマ画像を出力する設定でレンダリングを実行することで実装した。

次にS5では、正距円筒図のパノラマ画像と、各点の座標計算時の方向角 θ および仰角 φ から、各点に色情報を付与する。図-8に示す例の通り、正距

円筒図のパノラマ画像において画像の左下の画素が方向角-180度、仰角-90度、右上の画素が方向角+180度、仰角+90度となる。よって、方向角および仰角1度あたりの画素数を p とすると、方向角 θ および仰角 φ の点の色に対応する画素位置 (u, v) は、以下のように求められる。なお、式中の関数 $f(x)$ は、 x 以下の最大の整数を出力する関数である。

$$(u, v) = (f(p \cdot (\theta + 180)), f(p \cdot (\varphi + 90))) \quad (5)$$

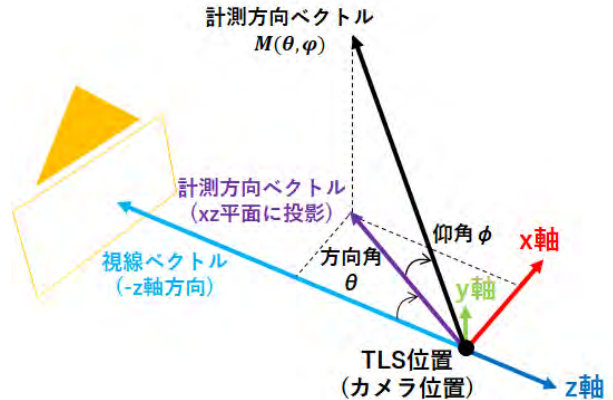


図-6: カメラオブジェクトのローカル座標系と計測方向ベクトルの定義



図-7: 座標計算における各パラメータの関係

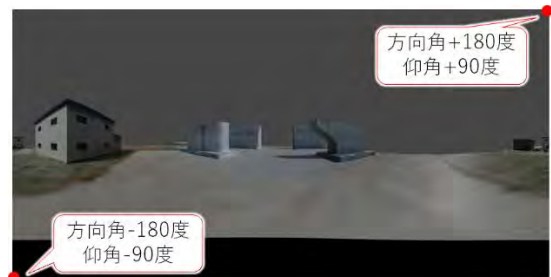


図-8: 正距円筒図のパノラマ画像の例

```
#.PCD v.7 - Point Cloud Data file format
VERSION .7
FIELDS x y z rgb
SIZE 4 4 4 4
TYPE F F F F U
COUNT 1 1 1 1
WIDTH 17803680
HEIGHT 1
VIEWPOINT 0 0 0 1 0 0 0
POINTS 17803680
DATA binary
```

図-9: PCD形式のヘッダ部の例

S6 では、S5 までに求めた点群の座標および色情報と、TLS の位置・姿勢情報を PCD 形式で出力する。PCD 形式は、図-9 に示すヘッダ部と、データ部から構成される。データ部は、ヘッダ部で指定されたデータの系列およびデータ型・データサイズに従って記述する必要がある。また、一般的に TLS は、TLS のローカル座標系における座標値を出力するが、例えば GNSS-TLS のように現場の座標系を計算できる TLS を想定した場合、点群の座標を現場座標系に座標変換して出力する必要がある。本研究では、点群の座標を直接座標変換するのではなく、PCD ファイルの VIEWPOINT に、TLS のローカル座標系から現場座標系への座標変換に必要なパラメータを記述することで、現場座標系への座標変換に対応することとした。

4. シミュレータを用いた計測精度・条件の検討

3 章で説明したシミュレータを用いて、GNSS-TLS による出来形計測を想定し、GNSS-TLS の計測精度をシミュレーションすることとした。シミュレーションは、図-1 に示すように 3 次元モデルと 3 つのターゲットスフィア、3 か所の TLS を配置し、盛土部の法面(2 面)と天端面を死角なく計測できることを確かめることとした。またその際の計測精度について検証することとした。

4.1 シミュレータのパラメータ

シミュレーションを実行するにあたり、設定した設定値の例を以下に示す。なお、ここで示す設定値の例は、研究室で保有している TLS(Leica 社 RTC360)のカタログスペック等を参考に決定した。

TLS の仕様に関する値は以下の通りとした。

- 計測範囲(距離 D)の最大/最小値：70m/2m
- 計測範囲(方向角 θ)： ± 180 度
- 計測範囲(仰角 φ)：方向 ± 67.5 度
- 角分解能：方向角 0.036 度/仰角 0.036 度

次に、点群の座標計算における誤差に関する項目は以下の通りとした。なお、誤差は正規分布に従うものとし、誤差の設定値は、誤差平均 μ 、標準偏差が σ のとき、 (μ, σ) と記載する。

- 計測距離の誤差 E_D ：(0.0m, 1.0 mm)
- 方向角の誤差 E_θ ：(0.0 度, 18 秒)
- 仰角の誤差 E_φ ：(0.0 度, 18 秒)

また、GNSS-TLS は、TLS の器械点設置位置や向きの計測が可能であるため、以下のように設定した。なお、TLS の向きの方位角誤差は、TLS を中心に 1m の距離に GNSS を 2 つ配置した場合を想定し決定した。

- TLS の器械点位置計測誤差
 - 水平方向(X 軸)：(0.0m, 0.02m)
 - 水平方向(Y 軸)：(0.0m, 0.02m)
 - 高さ方向：(0.0m, 0.03m)
- TLS の向きの方位角誤差：(0.0 度, 1.62 度)

その他の設定項目は以下の通りとした。

- 1 度当たりの画素数：6[pixel/degree]
- TLS の地上設置高さ：1.8[m]

4.2 シミュレータの実行結果

シミュレータの実行結果は、前出の図-1、図-2、図-3 の通りである。これらの図の通り、シミュレーションの条件で TLS を設置することで、計測対象エリアを概ね死角なく計測できることが分かった。また、表-1 に示す通り、TLS の器械点設置位置の計測誤差は、4.1 節で設定した TLS の器械点位置計測誤差の範囲から極端に離れていない(いずれも誤差の標準偏差の 2 倍以内である)ことが確かめられた。また、表-2 に示す通り、現場に設置したターゲットスフィアの座標値は、特に水平方向に 10cm 以上誤差があり、今回の TLS 設置条件においては標定点等を使用しないと出来形計測に必要な精度(土工ならば XY 軸方向に ± 5 cm など)を満たせない可能性が高いことが分かった。

表-1：TLS の器械点設置位置と誤差

	計測値[m]			真値[m]			誤差[mm]		
	X	Y	Z	X	Y	Z	dX	dY	dZ
TLS1	-35.8010	60.5700	6.0641	-35.8050	60.5810	6.1099	4.0	-11.0	-45.8
TLS2	-61.7810	75.5700	6.3003	-61.7753	75.6022	6.3031	-5.7	-32.2	-2.8
TLS3	-35.8010	90.5700	9.1209	-35.7909	90.5371	9.1439	-10.1	32.9	-23.0

表-2：ターゲットスフィアの設置位置と誤差

		真値[m]	計測値[m]	誤差[m]
tgt1	X	-39.9810	-40.1964	-0.2154
	Y	75.5050	75.5330	0.0280
	Z	7.4788	7.4994	0.0206
tgt2	X	-39.9810	-40.1452	-0.1642
	Y	83.9220	83.9471	0.0251
	Z	9.0987	9.1192	0.0205
tgt3	X	-53.7430	-53.8872	-0.1442
	Y	86.5380	86.6458	0.1078
	Z	6.1500	6.1712	0.0212

5. まとめ

本研究では、オープンソースの統合型 3 次元 CG 製作ソフトウェア「Blender」と Python スクリプトにより、3 次元モデルを用いて TLS の点群を出力するシミュレータを開発した。また開発したシミュレータを用いて、出来形計測を想定した TLS の器械点設置位置の検討を行える見通しを得た。

参考文献

- 国土交通省：3次元計測技術を用いた出来形管理要領（案）、令和5年3月
- Michael Gschwandtner・Roland Kwitt・Andreas Uhl・Wolfgang Pree：BlenSor: Blender Sensor Simulation Toolbox, ISVC 2011: Advances in Visual Computing, pp.199-208, 2011
- OpenRobotics：About Gazebo, <https://gazebosim.org/about> (Accessed 2023/7/31)